

АТМОСФЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КЛИМАТ

УДК 551.515.8 (589.1)

**СЕЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ АРКТИЧЕСКОГО ФРОНТА  
НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В XX И XXI ВЕКАХ**

**Е.А. Черенкова, Т.Б. Титкова, А.Ю. Михайлов**

*Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия;  
lcherenkova@marketresearch.ru*

Исследовано положение арктического фронта и его изменение на территории России в зимний и летний сезоны в конце XX – начале XXI в. по различным метеорологическим параметрам и в середине XXI в. по результатам численного моделирования климата на региональной климатической модели Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова. Показано, что на фоне продолжающегося наблюдаемого и прогнозируемого потепления на Севере России положение ветвей арктического фронта было квазистационарным во второй половине XX – начале XXI в. и, вероятно, останется таковым вплоть до 2060 г. (согласно данным региональной климатической модели). Региональной моделью прогнозируются разнонаправленные изменения интенсивности фронтальных процессов. В зимний период градиенты температуры в первой половине XXI в. могут уменьшиться практически на всей исследуемой территории. Летом в зоне прохождения главной ветви арктического фронта будет наблюдаться увеличение интенсивности фронтальных процессов, что может отразиться в структуре растительного покрова субарктического пояса Севера России.

*Арктический фронт, территория России, региональная климатическая модель, изменение климата*

**SEASONAL FEATURES OF ARCTIC FRONT  
ON THE TERRITORY OF RUSSIA IN THE 20th AND 21st CENTURIES**

**E.A. Cherenkova, T.B. Titkova, A.Yu. Mikhailov**

*Institute of Geography, RAS, 119017, Moscow, Staromonetny per., 29, Russia;  
lcherenkova@marketresearch.ru*

The location of the arctic front and its possible change on the territory of Russia was investigated using various meteorological parameters during the winter and summer seasons at the end of 20th – beginning of 21st century and using climate projection according to the regional climate model of Main Geophysical Observatory scenario. Warming was observed in the north of Russia at the end of 20th – beginning of 21st century. Location of the branches of the arctic front was quasi-steady in the same period. According to scenario of the regional model, it is expected that the situation will not change until 2060. The increase in temperatures in winter and summer will continue. It is possible to expect the multidirectional changes of the largest surface air temperature gradients as the characteristic of the arctic front. The values of gradients can be reduced on the territory during the winter season in the first half of 21st century. Increasing of the temperature gradient will be observed at the area of the main branch of the Arctic front in the summer. This can affect the structure of vegetation cover in the subarctic zone in the north of Russia.

*Arctic front, territory of Russia, regional climate model, climate change*

**ВВЕДЕНИЕ**

Климатические изменения в настоящее время наблюдаются во всех регионах Российской Федерации, однако в условиях продолжающегося потепления Арктики изучение изменений на территории Севера России продолжает оставаться весьма актуальным. В качестве причин арктического усиления потепления климата и деградации ледя-

ного покрова указывается увеличение поступления в регион тепла и влаги, сопровождающееся ростом притока длинноволновой радиации, накоплением тепла освобождающейся ото льда акваторией Северного Ледовитого океана, выносом большого количества льда и переходом к преобладанию однолетних льдов (из устного доклада

Г.В. Алексеева (ААНИИ) на семинаре в Институте глобального климата и экологии Росгидромета и РАН в октябре 2013 г.).

Интерес к климатологическому арктическому фронту (АФ) обусловлен вопросом устойчивости его географического положения в условиях меняющегося климата и наиболее интенсивного потепления в высоких широтах, поскольку его смещение ассоциируется прежде всего с изменениями в криолитозоне, а также в субарктических морских и континентальных экосистемах.

Изучение географического размещения климатологических фронтов было начато в середине XX в. С.П. Хромовым [1950]. Термин “климатологический фронт” означает среднее положение фронтов конкретного географического типа в определенном районе. В работе [Золотокрылин и др., 2014] отмечается, что арктический фронт имеет двойственную структуру и делится на основной и вторичный. Основной АФ размещается над морями Северной Атлантики и отделяет арктический воздух от умеренного морского в западной части и трансформированного над континентом умеренного (субарктического) воздуха в восточной части. Вторичный АФ размещается в северной части Евразии и отделяет субарктические воздушные массы от умеренных континентальных.

Цель статьи: по полученным на основе наблюдений метеорологическим параметрам и данным численного эксперимента, проведенного в Главной геофизической обсерватории (ГГО) им. А.И. Воейкова с использованием региональной климатической модели, исследовать особенности арктического фронта и его географическое положение на территории России зимой и летом в различные периоды XX и XXI вв.

#### ТЕРРИТОРИЯ, ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование было проведено в евроазиатском секторе территории России, ограниченном  $50^\circ$  и  $80^\circ$  с.ш.,  $27^\circ$  и  $90^\circ$  в.д.

При определении географического положения ветвей АФ мы исходили из того, что климатический фронт проходит в зоне барической ложбины, где формируются часто повторяющиеся синоптические фронты. То есть область с повышенной повторяемостью центров циклонов, максимальными значениями модуля горизонтального градиента температуры может указывать на климатический фронт [Михайлов и др., 2012; Золотокрылин и др., 2014].

Географическое положение арктического фронта в XX и начале XXI в. было выявлено на основе анализа минимальных значений полей приземного давления, области максимальной повторяемости центров циклонов на изобарической поверхности 1000 гПа (Н1000), максимальных на

той же поверхности величин горизонтальных градиентов температуры (АТ1000). Дополнительно рассматривался среднесезонный модуль адвекции тепла, который характеризует скорость горизонтального обмена и область максимального фронтотенеза. В качестве данных был использован реанализ Университета Восточной Англии (UEA CRU) [Центр..., 2011]. Был взят двумерный массив значений различных метеоэлементов с разрешением  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  (четыре метеорологических срока для Н1000 (гПа) и суточные значения для температуры на изобарической поверхности) в период с 1981 по 2012 г. Подробнее методика расчета характеристик арктического фронта содержится в [Золотокрылин и др., 2014].

Ввиду ограниченности данных моделирования для оценки возможных изменений в XXI в. рассмотрен наиболее простой метод выявления положения АФ на карте на основе определения областей с повышенными градиентами приземной температуры воздуха. Для сравнения климатического и модельного размещения АФ на суше в конце XX в. использованы среднемесячные данные приземной температуры воздуха реанализа CRU 3.21 с пространственным разрешением  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ .

Абсолютная величина градиента температуры  $Gt$  ( $^\circ\text{C}/1^\circ$  широты) рассчитывалась по формуле

$$Gt = \sqrt{Gx^2 + Gy^2}, \quad (1)$$

где  $Gx = (t_{i+1,j} + t_{i+1,j+1} - t_{i,j} - t_{i,j+1}) / (2 \cos \varphi)$  – широтная составляющая вектора температурного градиента;  $Gy = (t_{i,j+1} + t_{i+1,j+1} - t_{i,j} - t_{i+1,j}) / 2$  – меридиональная составляющая вектора;  $t$  – приземная температура воздуха;  $i$  – увеличивающийся с запада на восток индекс ячейки сетки модели по долготе;  $j$  – увеличивающийся с юга на север индекс ячейки сетки модели по широте;  $\varphi$  – географическая широта, на которой находится ячейка сетки.

Положение арктического фронта, изменение его характеристик в периоды 1981–2000, 2011–2030 и 2041–2060 гг. были проанализированы по результатам численного эксперимента на региональной климатической модели (РКМ) Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ГГО Росгидромета).

Встроенная в глобальную модель общей циркуляции атмосферы ГГО Т42L25 региональная модель с граничными условиями на поверхности океана, взятыми из результатов расчетов совместных моделей проекта СМIP3, включает описание основных физических процессов в атмосфере и на подстилающей поверхности: конвекции и конденсации, радиационного переноса в облачной атмосфере с учетом суточного хода, горизонтального и вертикального турбулентного обмена теплом, вла-

гой и моментом количества движения [Школьник и др., 2012a; Shkolnik et al., 2010]. При воспроизведении пространственно-временной изменчивости регионального климата моделью с высокой степенью детализации учитываются географические особенности территории России: наличие больших внутренних естественных/искусственных водоемов и рек, играющих существенную роль в формировании локального влагооборота, а также мезомасштабную орографию, влияющую на перемещение воздушных масс над равнинами России. Этому способствует высокое пространственное разрешение региональной модели, имеющей горизонтальное разрешение 25 км и 25 вертикальных слоев. В РКМ использован сценарий увеличения концентрации парниковых газов и аэрозолей в атмосфере SRES A2 по номенклатуре МГЭИК, соответствующий одному из наиболее сильных вариантов потепления климата. Рассмотрены ансамблевые оценки, включающие три модельных расчета с разными начальными условиями. С использованием данных более ранней версии модели предпринята попытка исследовать вариации полярного фронта на территории России в летние месяцы в различные климатологические периоды XXI в. [Черенкова, Школьник, 2012]. С помощью РКМ ГГО были изучены процессы, происходящие в криолитозоне, в частности, выполнена оценка возможных изменений состояния многолетнемерзлых и сезонномерзлых грунтов в XXI в. под влиянием потепления климата на территории Евразии [Надежина и др., 2008], проанализированы результаты моделирования эволюции мощности сезонноталого слоя в зоне вечной мерзлоты Сибирского региона [Школьник и др., 2012б].

Сравнение изменений по данным региональной модели было проведено по отношению к базовому для РКМ ГГО периоду 1981–2000 гг. Статистическая значимость результатов определялась с помощью критерия Стьюдента (t-test с уровнем значимости 0,95) для временных рядов разной длины.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проанализируем вначале, как изменилась приземная температура воздуха на рассматриваемой территории зимой и летом в конце XX – начале XXI в. и каковы тенденции ее будущих изменений. Зимой в период 2001–2012 гг. по сравнению с предыдущим двадцатилетием в северной части территории наблюдалось потепление в среднем на 0,64 °C в европейском и на 1 °C в азиатском секторах. Максимальный рост зимних температур составил 1 °C на севере европейской части России и 1,5 °C на севере Западной Сибири. В южной части территории отмечалось слабое похолодание: в среднем на 0,25 °C в европейском и на 1,2 °C в азиатском секторах. Летом в тот же период

в европейской части России имело место потепление, усиливающееся с востока на запад (от 0,4 до 0,8 °C), в Западной Сибири изменения температуры были неоднородными с незначительным похолоданием в небольшой области на юге и потеплением, увеличивающимся к северу до максимальных значений 1 °C.

Как показал анализ расчетов, согласно сценарному прогнозу РКМ ГГО, закономерности наблюдаемых изменений температуры воздуха во многом прослеживаются и в ближайшем будущем, и в середине XXI в. Рост изменений зимней температуры также будет наблюдаться в направлении с юга на север в оба рассмотренных периода XXI в. Однако потепление может затронуть всю территорию исследования: зимой в среднем за 2011–2030 гг. рост температуры может составить от 0,8–1,5 °C на юге территории до 1,5–2,0 °C на севере и к середине XXI в. от 2,5–3,0 °C на юге до 3,5–4,0 °C на севере европейского сектора и 4,5–5,0 °C на севере Западной Сибири. Летом в период 2011–2030 гг. моделью прогнозируются изменения температуры, аналогичные по структуре изменениям данных инструментальных наблюдений. Так, на всей европейской части территории может потеплеть на 0,5–1,0 °C, незначительно похолодать в небольшой области юга азиатского сектора и потеплеть на 0,5–1,0 °C на остальной его территории. В период 2041–2060 гг. по сравнению с последним двадцатилетием XX в. летом на всей территории ожидается потепление, которое может составить 1,5–2,0 °C.

В условиях продолжающегося наблюдаемого и прогнозируемого неравномерного потепления на территории исследования и наиболее ощутимого потепления на Севере России мониторинг экосистем и технических систем региона (особенно находящихся в криолитозоне) продолжает оставаться весьма актуальным. Для понимания динамики будущих процессов важно знать, как меняются и могут измениться в дальнейшем характеристики арктического фронта и его географическое положение.

Рассмотрим положение АФ по климатическим данным и модельным расчетам в зимний и летний периоды. Как ранее отмечалось в работе [Золотокрылин и др., 2014], зимой перед Скандинавией наблюдается устойчивое разделение АФ на главную и вторичную ветви.

На рис. 1, А показано положение АФ в зимний период 1981–2012 гг. по данным инструментальных наблюдений на основе оценки области максимальной повторяемости центров циклонов, максимальных величин высотных горизонтальных градиентов температуры и среднесезонного модуля адвекции тепла на фоне значений приземных градиентов температуры, а также по региональной модели ГГО за период 1981–2000 гг.

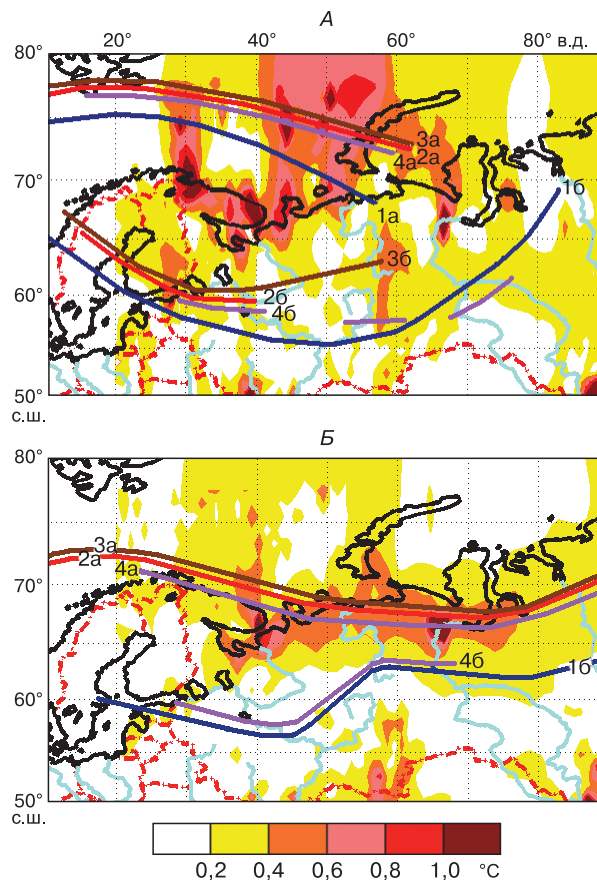
В зимний сезон главная ветвь АФ, проходящая по Баренцеву морю и пересекающая Новую Землю, находится в глубокой барической ложбине и выражена всеми анализируемыми характеристиками. Главная ветвь АФ (см. рис. 1, А) располагается в полосе максимальных градиентов температуры и максимального значения среднесезонного модуля адвекции тепла. Область, где сосредоточено максимальное количество центров циклонов, находится несколько южнее. На подстилающей поверхности область главной ветви АФ (см. рис. 1, А) сопровождается повышенными градиентами приземной температуры. Здесь же локализована и область повышенных градиентов приземной температуры, выявленных по данным региональной модели ГГО. К недостаткам воспроизведения фронта моделью можно отметить более слабую выраженность этой области над водной поверхностью по сравнению с данными наблюдений, что затрудняет выделение главной ветви арктического фронта.

Вторичная ветвь АФ (см. рис. 1, А) над северной частью Европейской России зимой достаточно хорошо выражена повышенной повторяемостью центров циклонов и среднесезонным модулем адвекции тепла и в меньшей степени максимальными высотными и приземными градиентами температуры воздуха. Здесь же располагается область повышенных градиентов температуры, рассчитанных по модели ГГО, которая ассоциируется со вторичной ветвью фронта. В Западной Сибири АФ прослеживается только по области максимальной повторяемости центров. Согласно модельным расчетам, в этом регионе отмечаются отдельные центры повышенных градиентов температуры между Иртышом и Обью, приближаясь к области высокой повторяемости центров циклонов.

Различия, возникающие при переходе на разные подстилающие поверхности (океан–суша) в районе Скандинавии и северного побережья России и проявляющиеся в повышенных градиентах приземной температуры и осадков, воспроизводятся в региональной модели более отчетливо, чем по данным наблюдений. Эта особенность РКМ ГГО несколько затрудняет выделение ветвей арктического фронта, маскируя присутствие ему повышенные значения градиентов.

Таким образом, главная ветвь (над Баренцевым морем) и вторичная ветвь (над сушей Севера России) арктического фронта в зимний период вполне удовлетворительно воспроизводятся региональной климатической моделью (см. рис. 1, А).

В летний период над территорией Севера России циклонические процессы менее интенсивны, чем в зимний. В среднем наблюдается размытое поле пониженного давления. При этом, используя несколько анализируемых характеристик так же, как и зимой, можно выделить две ветви АФ. Ос-

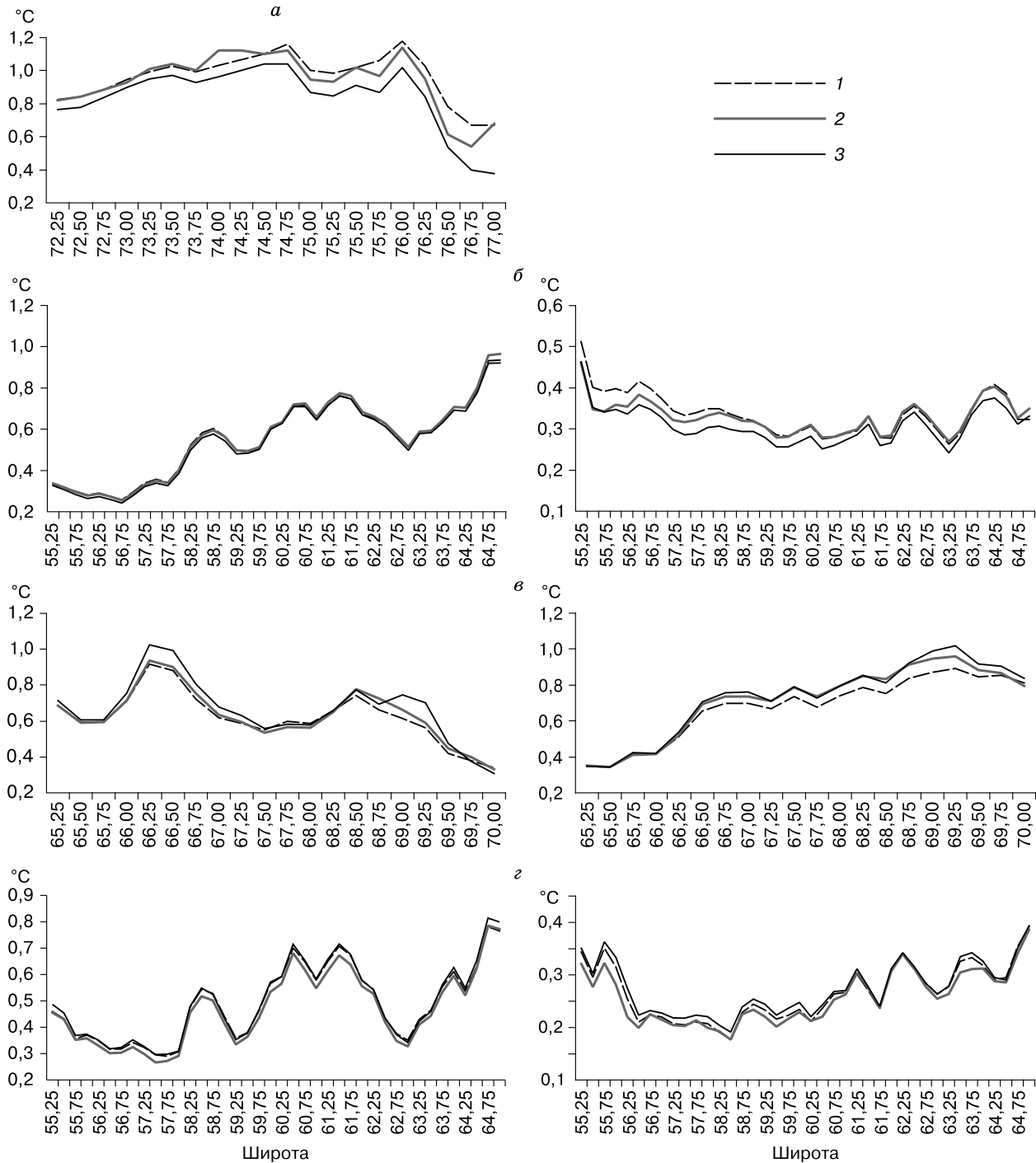


**Рис. 1. Положение арктического фронта (главной (а) и вторичной (б) ветвей) и поле градиентов приземной температуры зимой (А) и летом (Б) в период 1981–2012 гг.:**

1 – линия максимальной повторяемости центров циклонов на Н1000 (гПа); 2 – линия максимальных величин горизонтальных градиентов температуры на АТ1000 (гПа); 3 – линия максимальных значений среднесезонного модуля адвекции тепла; 4 – линия максимальных градиентов температуры по данным РКМ ГГО в 1981–2000 гг.

новная ветвь фронта (см. рис. 1, Б) выражена в приземном слое повышенными градиентами температуры, а также максимальными значениями среднесезонного модуля адвекции тепла и не является повышенной повторяемостью центров циклонов. Она проходит вдоль побережья Скандинавии и Кольского полуострова, выходит на сушу в районе 45-го меридиана, далее через Обскую губу на север Западной Сибири (см. рис. 1, Б). Здесь же находятся основные максимумы наблюдаемых градиентов приземной температуры. По модельным расчетам эта зона также выделяется повышенными градиентами температуры. Здесь происходит быстрая смена с юга на север лесотундрового редколесья в сочетании с тундрами (южная тундра) на тундрово-кустарничковую





**Рис. 2.** Широтное изменение градиента приземной температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) по данным РКМ ГГО в период 1981–2000 г. (1), 2011–2030 г. (2) и 2041–2060 г. (3) в зоне прохождения главной ветви АФ (а, б) в европейском (слева) и азиатском (справа) секторах России в зимний сезон и вторичной ветви АФ (в, г) в европейском (слева) и азиатском (справа) секторах России в летний сезон.

и кустарничково-моховую растительность (северная тундра).

Вторичная ветвь АФ в летний период (см. рис. 1, Б) по данным наблюдений выражена толь-

ко повышенной повторяемостью центров циклонов над северной частью Европейской России и Западной Сибири на изобарической поверхности Н1000 (гПа). По модельным расчетам она сопро-

вождается в европейской части России повышенными градиентами приземной температуры. Эта ветвь АФ на европейской части России проходит в зоне смены южнотаежных лесов на среднетаежные, а в Западной Сибири – в области перехода среднетаежных лесов к северотаежным сосновым лесам.

Следовательно, в летний период региональная климатическая модель адекватно отображает главную ветвь АФ (см. рис. 1, Б) на основе градиента приземной температуры. Воспроизведение вторичной ветви АФ прослеживается в основном на европейской части России и до 70° в.д. на востоке, исключая большую часть Западной Сибири (см. рис. 1, Б).

На основе проведенного исследования можно предположить, что так же, как и в XX в., в XXI в. зимой главная ветвь арктического фронта будет находиться в секторе, ограниченном 72–77° с.ш. и 27–60° в.д., а летом – 65–70° с.ш. и 27–90° в.д. Вторичная ветвь и зимой, и летом будет размещаться в прямоугольной области с границами 55–65° с.ш. и 27–90° в.д. Осреднение рассмотренных характеристик проведено в пределах этих прямоугольных областей, отдельно для европейского и азиатского секторов России.

Рассмотрим зонально осредненную картину зимних и летних изменений градиентов температуры на территории России, полученную по данным РКМ ГГО в периоды 2011–2030 и 2041–2060 гг. по отношению к базовому периоду. На рис. 2 видно, что положение арктического фронта над территорией России по данным моделирования достаточно устойчиво в оба сезона.

Несмотря на изменение осредненных значений градиентов, области их максимальных значе-

ний в указанные периоды XXI в. не будут существенно смещаться относительно положения аналогичных областей в последнем двадцатилетии XX в. Наименьшим изменениям будет подвержен европейский сектор, где располагается вторичная ветвь АФ (см. рис. 2, б, з).

Таким образом, можно утверждать, что по данным РКМ ГГО положение арктического фронта останется квазистационарным в зимний и летний сезоны вплоть до 60 г. текущего столетия.

На фоне наблюдаемой в последние 30 лет и прогнозируемой до 2060 г. квазистационарности ветвей АФ имели место и предполагаются в дальнейшем изменения интенсивности фронтальных процессов. Из анализа значений градиентов приземной температуры воздуха по данным реанализа и РКМ ГГО следует, что изменения их по обоим массивам данных имеют одинаковый порядок (см. таблицу), а изменения высотных градиентов температуры несколько больше, что объясняется различием высот измерений. Отметим также отличия в порядке значений осредненных в пределах суши по данным реанализа и модели изменений градиентов, связанные с контрастностью отображения полей термических градиентов в РКМ ГГО при переходе с одной подстилающей поверхности на другую.

Согласно сценарному прогнозу РКМ ГГО, изменения повышенных градиентов температуры приземного воздуха в среднем по зоне действия каждой ветви АФ будут иметь разнонаправленные тенденции в оба рассмотренных периода XXI в. по сравнению с последним двадцатилетием прошлого века (см. таблицу). В зимний период градиенты температуры в XXI в. уменьшатся практически на всей территории исследования, увеличатся лишь в

**Изменение осредненных градиентов температуры на поверхности АТ1000 (гПа) в зоне действия АФ в 1981–2012 гг. по сравнению с 1951–1980 гг., градиентов приземной температуры воздуха в 2001–2012 гг. (по данным CRU) и градиентов приземной температуры в XXI в. по сравнению с 1981–2000 гг. (по данным РКМ ГГО)**

Сезон; ветвь АФ	Градиенты температуры, °С				Градиенты приземной температуры, °С								
	на поверхности АТ1000 (гПа)		приземной воздуха		2011–2030 гг.		2041–2060 гг.		2011–2030 гг.		2041–2060 гг.		
	1981–2012 гг.		2001–2012 гг.		ЕТР				ЗС				
	ЕТР	ЗС	ЕТР	ЗС	Вся террит.	Суша	Вся террит.	Суша	Вся террит.	Суша	Вся террит.	Суша	
	По данным CRU				По данным РКМ ГГО								
<i>Зима</i>													
Главная ветвь	-1,0	-	-0,03	-	<i>-0,02</i>	<i>0,3</i>	<i>-0,1</i>	<i>0,2</i>	-	-	-	-	
Вторичная ветвь	-0,2	-0,2	-0,02	-0,02	0	0	<i>-0,01</i>	<i>-0,01</i>	-0,01	-0,01	<i>-0,03</i>	<i>-0,03</i>	
<i>Лето</i>													
Главная ветвь	0,08	0,1	-0,02	-0,02	0,01	-0,01	<i>0,04</i>	<i>0,03</i>	0,03	<i>0,02</i>	<i>0,05</i>	<i>0,04</i>	
Вторичная ветвь	0,04	0	0,01	-0,02	-0,02	-0,02	0,01	0,01	<i>-0,01</i>	<i>-0,01</i>	0,01	0,01	

Примечание. Статистически значимые изменения по данным РКМ ГГО выделены курсивом. ЕТР – европейская территория России; ЗС – Западная Сибирь.

зоне действия главной ветви АФ на территории Новой Земли и не изменятся в ближайшие неполные 20 лет в зоне вторичной ветви АФ. Летом в XXI в. в зоне прохождения главной ветви арктического фронта по всей территории исследования будет наблюдаться увеличение интенсивности фронтальных процессов. В европейском секторе это увеличение будет происходить за счет роста градиентов температуры над водной поверхностью. В области размещения вторичной ветви АФ изменения градиентов будут неоднородными: уменьшившись в летний сезон в период 2011–2030 гг. интенсивность фронтальных процессов вновь возрастет к середине XXI в. Увеличение летнего температурного контраста к середине XXI в. в зоне прохождения главной ветви АФ может отразиться в структуре растительного покрова субарктического пояса Севера России. В частности, в уменьшении области переходной зоны между южной и северной тундрой на европейской части территории, а в Западной Сибири между лесотундровым редколесьем и тундровой растительностью.

Возможные изменения повышенных градиентов температуры приземного воздуха в 2011–2030 гг. по сравнению с базовым двадцатилетием статистически значимы лишь летом в области размещения вторичной ветви фронта на территории Западной Сибири. К середине XXI в. аналогичные изменения могут стать статистически значимыми в зимний сезон на европейской территории России в области главной и вторичной ветвей арктического фронта, в Западной Сибири – в зоне действия вторичной ветви фронта, а летом статистически значимые изменения ожидаются вдоль всей главной ветви АФ.

Увеличение интенсивности градиентов климатических параметров в зоне вторичной ветви АФ просматривается только от 1981–2000 гг. к современному периоду. В дальнейшем значимых изменений не предвидится, что, очевидно, не внесет существенных изменений в характеристики растительного покрова.

### ВЫВОДЫ

Анализ инструментальных результатов XX–начала XXI в. и данных региональной климатической модели ГГО в отдельные периоды XXI в. позволяет сделать следующие выводы.

Установлено, что наиболее ощутимое потепление в 2001–2012 гг. по сравнению с предыдущим двадцатилетием зафиксировано на Севере России: зимой до 1,0–1,5 °С, летом до 0,6–1,0 °С.

На основе данных РКМ ГГО показано, что закономерности наблюдаемых изменений температуры воздуха могут сохраниться и в ближайшем

будущем, и в середине XXI в. Ожидаемое потепление затронет всю территорию исследования: в период 2041–2060 гг. температура воздуха зимой может возрасти в среднем на 3 °С. Летнее потепление в 2041–2060 гг. может составить в среднем 1,7 °С в европейском секторе и 1,6 °С в азиатском секторе.

Выявлено, что над территорией Севера России (до 90° в.д.) выделяются две ветви арктического фронта. Зимой главная ветвь располагается над Баренцевым морем, вторичная ветвь локализуется над сушей Севера России в районе 55–60° с.ш. на европейской части России, а в Западной Сибири уходит севернее, к 70° с.ш. Летом главная ветвь АФ смещается к югу и частично в своей восточной части проходит над континентом. Вторичная ветвь в летний сезон на западе европейской части России находится примерно в тех же широтах, что и зимой, а в Западной Сибири наблюдается на 62–64° с.ш.

В северной части территории на фоне продолжающегося наблюдаемого и прогнозируемого потепления положение арктического фронта остается квазистационарным по данным наблюдений за последние 30 лет и будет таковым на всей территории исследования в период до 2060 г. согласно региональной климатической модели. При этом общие закономерности сезонного размещения АФ на территории России также сохранятся.

На фоне квазистационарности ветвей АФ зимой и летом в рассмотренные периоды XXI в. по сравнению с последним двадцатилетием XX в. региональную моделью прогнозируются разнонаправленные изменения интенсивности фронтальных процессов. Летом в зоне прохождения главной ветви арктического фронта по всей территории исследования будет наблюдаться увеличение интенсивности фронтальных процессов, что может отразиться в структуре растительного покрова субарктического пояса Севера России.

Авторы выражают благодарность И.М. Школьнику за предоставленные данные региональной климатической модели ГГО им. А.И. Воейкова.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-05-00031).

### Литература

- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Михайлов А.Ю.** Климатические вариации арктического фронта и ледовитости Баренцева моря зимой // *Лед и снег*, 2014, № 1, с. 85–90.
- Михайлов А.Ю., Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б.** Полярный фронт над равнинами России летом // *Метеорология и гидрология*, 2012, № 2, с. 24–29.
- Надежина Е.Д., Школьник И.М., Павлова Т.В., Молькентин Е.К., Семиошина А.А.** Реакция вечной мерзлоты на потепление климата: оценки с помощью региональной климатической модели // *Криосфера Земли*, 2008, т. XII, № 3, с. 3–11.

**Хромов С.П.** Географическое размещение климатологических фронтов // Изв. Всесоюз. геогр. о-ва, 1950, т. 82, вып. 2, с. 126–137.

**Центр данных** Университета Восточной Англии. 2011. URL: <http://www.cgu.uea.ac.uk/cgu/data/ncsr/> (дата обращения: 05.11.2013).

**Черенкова Е.А., Школьник И.М.** Возможное положение полярного фронта над Восточно-Европейской равниной в середине XXI в. // Изв. РАН. Сер. геогр., 2012, № 6, с. 17–22.

**Школьник И.М., Мелешко В.П., Ефимов С.В., Стафеева Е.Н.** Изменения экстремальности климата на территории Сибири к середине XXI века: ансамблевый прогноз по

региональной модели ГГО // Метеорология и гидрология, 2012а, № 2, с. 5–23.

**Школьник И.М., Надежина Е.Д., Павлова Т.В. и др.** Моделирование региональных особенностей сезонного слоя в зоне вечной мерзлоты на территории Сибири // Криосфера Земли, 2012б, т. XVI, № 2, с. 52–59.

**Shkolnik I.M., Nadyozhina E.D., Pavlova T.V., Molken-  
tin E.K., Semioshina A.A.** Snow cover and permafrost evolution in Siberia as simulated by the MGO regional climate model in the 20 and 21 centuries // Environ. Res. Lett., 2010, vol. 5, No. 1, p. 1–8.

*Поступила в редакцию  
5 марта 2014 г.*